

Fitorremediación de efluentes secundarios de curtiembre mediante monocultivos y policultivos de *Eichhornia crassipes* y *Chrysopogon zizanioides*

*Phytoremediation of secondary tannery effluent using monocultures and polycultures of *Eichhornia crassipes* and *Chrysopogon zizanioides**

- 1 Bruno Manuel Escobar Jumbo  <https://orcid.org/0009-0003-8461-3137>
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador.
bruno2345@uta.edu.ec
- 2 JNelly Esther Flores Tapia  <https://orcid.org/0000-0002-0851-8117>
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador.
ne.flores@uta.edu.ec
- 3 Rodny David Peñafiel Ayala  <https://orcid.org/0000-0003-1923-2525>
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador.
rp.penafiel@uta.edu.ec
- 4 Lander Vinicio Perez Aldas  <http://orcid.org/0000-0001-8398-3759>
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador.
lv.perez@uta.edu.ec
- 5 Juan de Dios Espinoza Moya  <https://orcid.org/0000-0002-9123-0236>
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador.
jd.espinoza@uta.edu.ec

Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 11/07/2026

Revisado: 13/08/2026

Aceptado: 18/09/2026

Publicado: 08/10/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v10i4.3772>

Cítese:

Escobar Jumbo, B. M., Flores Tapia, N. E., Peñafiel Ayala, R. D., Perez Aldas, L. V., & Espinoza Moya, J. de D. (2026). Fitorremediación de efluentes secundarios de curtiembre mediante monocultivos y policultivos de *Eichhornia crassipes* y *Chrysopogon zizanioides*. *Ciencia Digital*, 10(4), 79-99. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v10i4.3772>



Ciencia Digital
Editorial



CIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinaria, trimestral, que se publicará en soporte electrónico tiene como misión contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://cienciadigital.org>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec.

Esta revista está protegida bajo una licencia *Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 International*. Copia de la licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.



Palabras claves:

Aguas residuales de curtiembre; humedal construido; jacinto de agua; vetiver; cromo hexavalente; policultivo.

Resumen: **Introducción:** la industria curtidora genera efluentes complejos con materia orgánica, sales, nutrientes y metales que pueden superar los límites de descarga. **Objetivos:** el objetivo fue comparar la capacidad fitorremediadora de *Eichhornia crassipes* y *Chrysopogon zizanioides*, empleadas individualmente y en policultivo, sobre un efluente secundario de una curtiembre de Tungurahua, Ecuador. **Metodología:** el estudio tuvo un enfoque cuantitativo, fue de tipo aplicado y se desarrolló mediante un diseño experimental, longitudinal y comparativo. Se manipuló deliberadamente el factor tratamiento, conformado por un control sin plantas y tres sistemas de fitorremediación: *Eichhornia crassipes*, *Chrysopogon zizanioides* y la combinación de ambas especies, se instalaron cuatro tratamientos por triplicado en unidades de 18 L: control sin plantas (T0), *E. crassipes*, 500 g (T1), *C. zizanioides*, 500 g (T2), y combinación 1:1 de ambas especies, 250 g de cada una (T3). Durante 45 días se determinaron parámetros fisicoquímicos obligatorios en el TULSMA, en los días 0, 7, 15, 30 y 45. Los datos se analizaron mediante ANOVA de dos factores y prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). **Resultados:** Al día 45, T3 redujo respecto del valor inicial la DBO5 en 83,6 %, Cr(VI) en 75,0 %, turbidez en 99,2 %, color en 70,9 %, nitrógeno total en 71,1 %, amonio en 60,3 % y sólidos suspendidos totales en 60,9 %. Frente al control final, T3 presentó concentraciones 50,0 % menores de DBO5, 74,1 % menores de Cr(VI), 47,8 % menores de color y 77,8 % menores de nitrógeno. Sin embargo, la DQO, conductividad, amonio y sólidos totales permanecieron por encima de los límites aplicables, y los sólidos totales aumentaron 20,7 % respecto del inicio. **Conclusiones:** las interacciones tratamiento $\times$ tiempo fueron significativas para la mayoría de los parámetros, excepto fósforo y oxígeno disuelto. El policultivo constituyó una etapa complementaria prometedora, pero no un tratamiento autónomo suficiente para el cumplimiento integral de la normativa. Área de estudio general: Medio ambiente. Área de estudio específica: Descontaminación de aguas residuales mediante fitorremediación. Tipo de artículo: artículo original.

Keywords: Tannery wastewater; constructed wetland;

Abstract: Introduction: The tanning industry generates complex effluents containing organic matter, salts, nutrients, and metals that may exceed discharge limits. This study compared the phytoremediation

water hyacinth; vetiver; hexavalent chromium; polyculture.

capacity of *Eichhornia crassipes* and *Chrysopogon zizanioides* used individually and as a polyculture for treating secondary tannery effluent from Tungurahua, Ecuador. Four treatments were established in triplicate using 18-L units: an unplanted control (T0), 500 g *E. crassipes* (T1), 500 g *C. zizanioides* (T2), and a 1:1 combination containing 250 g of each species (T3). Physicochemical parameters were measured over 45 days on days 0, 7, 15, 30, and 45. Data was analyzed using two-way ANOVA and Tukey's test ($\alpha = 0.05$). On day 45, T3 decreased BOD5 by 83.6 %, Cr(VI) by 75.0 %, turbidity by 99.2 %, color by 70.9 %, total nitrogen by 71.1 %, ammonium by 60.3 %, and total suspended solids by 60.9 % relative to baseline. Compared with the final control, T3 showed 50.0 % lower BOD5, 74.1 % lower Cr(VI), 47.8 % lower color, and 77.8 % lower total nitrogen. Nevertheless, COD, conductivity, ammonium, and total solids remained above the applicable limits, while total solids increased by 20.7 % from baseline. Treatment $\times$ time interactions were significant for most variables, except phosphorus and dissolved oxygen. The polyculture was a promising complementary treatment stage but was insufficient as a stand-alone process to achieve comprehensive regulatory compliance.

1. Introducción

El curtido de pieles transforma una matriz biológica putrescible en un material estable mediante operaciones de ribera, curtido y acabado que consumen agua y emplean sales, sulfuros, álcalis, colorantes, tensoactivos y agentes engrasantes. El curtido al cromo continúa siendo predominante por la estabilidad térmica y mecánica que confiere al cuero, pero también genera corrientes líquidas con elevada demanda de oxígeno y mezclas de contaminantes inorgánicos y orgánicos (Oruko et al., 2020; Zhao & Chen, 2019). La composición del efluente varía con la materia prima, la tecnología y la se-

gregación de corrientes, por lo que un único proceso raramente elimina simultáneamente materia orgánica, sales y metales.

Los tratamientos fisicoquímicos pueden remover fracciones importantes de sólidos y cromo, aunque producen lodos y requieren reactivos. Por ejemplo, la precipitación con CaO o Ca(OH)₂ disminuye contaminantes del efluente de curtiembre, pero puede elevar la dureza y transferir la carga contaminante a una fase sólida (Reyes-Serrano et al., 2020). En consecuencia, los sistemas biológicos y los humedales construidos se estudian como etapas de pulimiento de menor demanda energética, especialmente

cuando el efluente ya recibió un tratamiento primario o secundario (Alemu et al., 2021; Zhao et al., 2022).

La fitorremediación aprovecha la absorción, adsorción, precipitación, rizofiltración y transformación microbiana que ocurren alrededor de las raíces (Xin et al., 2019). *Eichhornia crassipes* presenta alta producción de biomasa y un sistema radical suspendido que ofrece superficie para biopelículas (Darajeh et al., 2014); se ha utilizado para remover nitrógeno amoniacal, materia orgánica y metales (Ting et al., 2018). *Chrysopogon zizanioides*, conocido como vetiver, posee un sistema radical denso, tolerancia a condiciones adversas y capacidad para estabilizar o acumular contaminantes (Darajeh et al., 2019). No obstante, la senescencia vegetal puede devolver sólidos y nutrientes al agua, por lo que la cosecha y la adaptación de la biomasa son variables decisivas (Kumar et al., 2019).

El policultivo podría ampliar los nichos radiculares y combinar mecanismos complementarios. Estudios en humedales construidos muestran que los patrones de plantación mixta modifican el desempeño de depuración y la comunidad microbiana de la rizosfera (Zhang et al., 2024). Sin embargo, existe poca evidencia experimental sobre la combinación directa de *E. crassipes* y *C. zizanioides* en efluentes secundarios reales de curtiembre. Además, la simple comparación entre la concentración inicial y la final puede sobreestimar el efecto vegetal cuando el control también cambia por sedimentación, volatilización, fotólisis o actividad micro-

biana endógena.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar, durante 45 días, la capacidad de ambas macrófitas empleadas individualmente y en combinación para modificar la calidad de un efluente secundario de curtiembre. La interpretación priorizó dos comparaciones: cambio respecto de la concentración inicial y diferencia frente al control final. Se planteó que el tipo de tratamiento, el tiempo y su interacción afectarían de forma significativa los principales parámetros de calidad del agua.

2. Metodología

El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, fue de tipo aplicado y se desarrolló mediante un diseño experimental, longitudinal y comparativo. Se manipuló deliberadamente el factor tratamiento, conformado por un control sin plantas y tres sistemas de fitorremediación: *Eichhornia crassipes*, *Chrysopogon zizanioides* y la combinación de ambas especies. El efecto de los tratamientos se evaluó mediante la medición de las características fisicoquímicas del efluente durante un periodo de 45 días. Este diseño permitió comparar los cambios producidos en función del tipo de tratamiento y del tiempo de exposición.

2.1 Efluente y diseño experimental

El estudio experimental se ejecutó en el laboratorio de investigación 1.4 de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato. El efluen-

te secundario se obtuvo de una curtiembre localizada en Tungurahua que autorizó el análisis y la publicación de los resultados bajo reserva de identidad. La muestra para caracterización se recolectó antes de la descarga al alcantarillado conforme a los criterios de Standard Methods; el volumen destinado al experimento se conservó a 4 °C hasta la instalación (Baird et al., 2017).

Se utilizaron recipientes de 18 L como unidades experimentales disponiendo las plantas como se observa en la **Figura 1**.



Figura 1: Recipientes de 18 L empleados como unidades experimentales

Fuente: fotografía original del experimento.

Cada tratamiento contó con tres réplicas: T0, efluente sin plantas; T1, 500 g de *E. crassipes*; T2, 500 g de *C. zizanioides*; y T3, 250 g de *E. crassipes* más 250 g de *C. zizanioides*, como se resume en la **Tabla 1**.

Las plantas comerciales, mostradas en la **Fi-**

gura 2, se lavaron, pesaron y desinfectaron superficialmente antes de ubicarlas en soportes flotantes. Las unidades se airearon cada dos días durante una hora mediante bombas de 2,5 W con caudal nominal de 3,2 L/min. El ensayo duró 45 días y se efectuaron determinaciones en los días 0, 7, 15, 30 y 45.



Figura 2: Material vegetal empleado: *E. crassipes* (izquierda) y *C. zizanioides* (derecha)

Fuente: fotografías originales del experimento.

2.1.1 Determinaciones analíticas

La demanda química de oxígeno (DQO) se determinó por reflujo cerrado colorimétrico (método 5220 D) y la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO5) mediante el sistema respirométrico OxiTop, en concordancia con Standard Methods (Baird et al., 2017). Se midieron además fósforo total, Cr(VI), oxígeno disuelto, turbidez, conductividad, color real, nitrógeno total, amonio, sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos totales (SST). Para la caracterización ampliada inicial y final se incluyeron aluminio, bromo, calcio, cloruros, cobre, dureza, fluoruros, fosfatos, hierro, magnesio, molibdeno, níquel, nitratos, potasio, sulfatos, surfactantes, zinc, manganeso, fenoles, coliformes fecales, grasas y aceites. Se emplearon métodos gravimétricos, espectrofo-

Tabla 1: Diseño de los tratamientos de fitorremediación

Código	Composición	Biomasa vegetal	Volumen	Réplicas
T0	Control sin plantas	0 g	18 L	3
T1	<i>E. crassipes</i>	500 g	18 L	3
T2	<i>C. zizanioides</i>	500 g	18 L	3
T3	<i>E. crassipes</i> + <i>C. zizanioides</i> (1:1)	250 + 250 g	18 L	3

tométricos, electroquímicos y microbiológicos y reactivos comerciales Hach y Hanna Instruments.

La conformidad se contrastó con los límites de descarga aplicables del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (2017). Debido a que la norma distingue destino de descarga y no establece límites para todos los indicadores, la comparación regulatoria se presenta únicamente cuando existe un valor de referencia inequívoco en la documentación experimental.

2.1.2 Cálculos y análisis estadístico

El cambio porcentual se recalculó sin valor absoluto utilizando la **Ecuación [1]**:

$$(\%) = \frac{[C_0 - C_t]}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

donde C0 es la media inicial común y Ct la media del tratamiento en el tiempo t. Los valores positivos indican reducción y los negativos, incremento. Esta convención corrige la posibilidad de presentar aumentos como si fueran remociones. Para separar el efecto vegetal de los procesos ocurridos en ausencia de plantas, también se calculó la diferencia relativa frente al control final, utilizando la **Ecuación [2]**:

$$(\%) = \frac{[C_{control,45} - C_{tratamiento,45}]}{C_{control,45}} \times 100\% \quad (2)$$

Al final se aplicó un diseño factorial tratamiento × tiempo y analizó cada variable mediante ANOVA de dos factores, seguido por Tukey con $\alpha = 0,05$. Se conservaron los estadísticos F y los grados de libertad informados en los anexos. La inferencia se limitó a los parámetros con series temporales y réplicas disponibles; las determinaciones realizadas únicamente al inicio y al final se interpretaron de manera descriptiva.

3. Resultados

Los resultados se presentan de acuerdo con la evolución de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del efluente durante los 45 días de tratamiento. En primer lugar, se describe la caracterización inicial del agua residual; posteriormente, se comparan los cambios registrados en el control y en los tratamientos con *Eichhornia crassipes*, *Chrysopogon zizanioides* y la combinación de ambas especies. También se exponen los porcentajes de cambio respecto del valor inicial, las diferencias frente al control final, el cumplimiento de los valores de referencia y los efectos del tratamiento, el tiempo y su interacción. Finalmente, se presentan la

caracterización ampliada del efluente y el seguimiento visual de las especies vegetales.

3.1 Calidad inicial del efluente

En la Tabla 2 el efluente presentó una matriz de elevada carga orgánica y salina. La DQO inicial fue $1833,33 \pm 3,28$ mg/L y la DBO5 $916,67 \pm 0,33$ mg/L; ambas superaron los valores de referencia de 500 y 250 mg/L. La relación DBO5/DQO fue 0,50, compatible con una fracción biodegradable apreciable. La turbidez alcanzó $879,67 \pm 10,87$ NTU, la conductividad $5989,67 \pm 1,45$ μ S/cm y el color $1660 \pm 1,53$ PCU. También se observaron concentraciones elevadas de nitrógeno total ($140 \pm 1,15$ mg/L) y amonio ($318 \pm 0,31$ mg/L). Por el contrario, Cr(VI), fósforo total y SST se encontraban por debajo de los límites consignados, aunque su reducción continúa siendo ambientalmente relevante en un sistema de pulimiento.

3.2 Desempeño al día 45

La comparación que se muestra en la Tabla 3, de medias finales mostró que ninguna configuración fue superior para todos los indicadores. T2 produjo la menor DQO ($1221,11 \pm 19,57$ mg/L) y, junto con T3, la menor DBO5 (150,00 mg/L). T3 alcanzó las menores concentraciones de Cr(VI) ($0,07 \pm 0,03$ mg/L), turbidez ($7,08 \pm 1,56$ NTU), conductividad ($4223,67 \pm 47,20$ μ S/cm) y SST ($58,89 \pm 3,61$ mg/L). T2 presentó la menor concentración de color ($478,89 \pm 4,49$ PCU), nitrógeno total ($25,00 \pm 0,80$ mg/L) y amonio ($107,44 \pm 14,04$ mg/L).

La **Tabla 4** muestra que los tratamientos con plantas produjeron mayores reducciones que el control para la mayoría de los parámetros al día 45, aunque el desempeño varió según la especie. T2 alcanzó las mayores disminuciones de DQO (33,4 %), color (71,2 %) y nitrógeno total (82,1 %); T1 fue más eficiente para el amonio (71,4 %); mientras que el policultivo T3 destacó en la remoción de Cr(VI) (75,0 %), turbidez (99,2 %) y SST (60,9 %), e igualó a T2 en DBO_5 (83,6 %). La comparación con el control final confirma ventajas importantes de T3 para nitrógeno total (77,8 %), Cr(VI) (74,1 %), amonio (58,7 %), color (47,8 %) y conductividad (47,1 %). Sin embargo, T3 no superó al control para fósforo, sólidos totales y SST, como indican los valores negativos de -6,3, -26,7 y -15,5 %, respectivamente. Además, la elevada reducción de turbidez y SST registrada en T0 evidencia que procesos como sedimentación también contribuyeron a la disminución observada, por lo que no toda la remoción puede atribuirse exclusivamente a las plantas.

La **Figura 3** evidencia que la respuesta de los tratamientos fue específica para cada contaminante y que no existió una configuración universalmente superior. Los tres sistemas vegetados alcanzaron reducciones elevadas de DBO_5 , turbidez, color, nitrógeno total, amonio y SST; sin embargo, T2 (C. zizanioides) presentó el mejor desempeño para DQO, color y nitrógeno total, T1 (E. crassipes) para amonio, y el policultivo T3 para Cr(VI), conductividad y SST. La turbidez disminuyó aproximadamente 98–99 % en todos los tratamientos,

Tabla 2: Caracterización inicial seleccionada del efluente secundario

Parámetro	Unidad	Media $\pm$ DE	Referencia TULSMA
DQO	mg/L	1833,33 $\pm$ 3,28	500 (No cumple)
DBO ₅	mg/L	916,67 $\pm$ 0,33	250 (No cumple)
Fósforo total	mg/L	4,33 $\pm$ 0,09	15 (Sí)
Cr(VI)	mg/L	0,28 $\pm$ 0,33	0,50 (Sí)
Turbidez	NTU	879,67 $\pm$ 10,87	100 (No cumple)
Conductividad	μ S/cm	5989,67 $\pm$ 1,45	1000 (No cumple)
Nitrógeno total	mg/L	140,00 $\pm$ 1,15	60 (No cumple)
Amonio	mg/L	318,00 $\pm$ 0,31	30 (No cumple)
Sólidos totales	mg/L	2190,67 $\pm$ 16,83	1600 (No cumple)
SST	mg/L	150,67 $\pm$ 2,40	220 (Sí)

Nota. DE: desviación estándar; SST: sólidos suspendidos totales. Los límites se reproducen según la matriz TULSMA.

Tabla 3: Concentraciones finales de los tratamientos al día 45

Parámetro	T0	T1	T2	T3
DQO (mg/L)	1686,67 $\pm$ 1,17	1243,33 $\pm$ 27,37	1221,11 $\pm$ 19,57	1291,11 $\pm$ 31,12
DBO ₅ (mg/L)	300,00 $\pm$ 0,00	183,33 $\pm$ 9,62	150,00 $\pm$ 0,00	150,00 $\pm$ 0,00
Fósforo (mg/L)	1,60 $\pm$ 0,01	1,90 $\pm$ 0,16	2,33 $\pm$ 0,19	1,70 $\pm$ 0,12
Cr(VI) (mg/L)	0,27 $\pm$ 0,07	0,18 $\pm$ 0,28	0,13 $\pm$ 0,26	0,07 $\pm$ 0,03
Turbidez (NTU)	10,01 $\pm$ 0,01	7,38 $\pm$ 0,79	20,28 $\pm$ 2,17	7,08 $\pm$ 1,56
Conductividad (μ S/cm)	7981,67 $\pm$ 1,26	4778,44 $\pm$ 87,35	4352,89 $\pm$ 80,57	4223,67 $\pm$ 47,20
Color (PCU)	926,67 $\pm$ 1,50	501,11 $\pm$ 9,05	478,89 $\pm$ 4,49	483,33 $\pm$ 37,38
N total (mg/L)	182,00 $\pm$ 0,10	44,33 $\pm$ 1,61	25,00 $\pm$ 0,80	40,44 $\pm$ 1,77
Amonio (mg/L)	305,33 $\pm$ 0,08	90,91 $\pm$ 5,84	107,44 $\pm$ 14,04	126,11 $\pm$ 15,08
ST (mg/L)	2086,67 $\pm$ 5,35	3177,33 $\pm$ 49,22	2750,44 $\pm$ 42,63	2643,67 $\pm$ 35,93
SST (mg/L)	51,00 $\pm$ 0,58	83,67 $\pm$ 28,20	62,00 $\pm$ 5,11	58,89 $\pm$ 3,61

Nota. Valores expresados como media $\pm$ DE (n = 3). T0: control; T1: *E. crassipes*; T2: *C. zizanioides*; T3: combinación 1:1.

aunque este resultado debe interpretarse junto con el control, donde también se observó una reducción elevada, lo que indica una importante contribución de la sedimentación. En contraste, los valores negativos de sólidos totales muestran que su concentración aumentó entre 20,7 y 45,0 % en los sistemas vegetados, posiblemente por evaporación, concentración de sales y liberación de material vegetal durante la senescencia.

En conjunto, la **Figura 3** demuestra que la fitorremediación fue eficaz para disminuir diversos contaminantes, pero también que el policultivo no produjo una ventaja general sobre los monocultivos y que el sistema requiere control de biomasa y un tratamiento complementario para sólidos y sales.

La **Tabla 5** y la **Figura 4** muestran que los tratamientos vegetados cumplieron los valores de referencia para DBO₅, Cr(VI), turbi-

Tabla 4: Cambio porcentual corregido al día 45 y diferencia de T3 frente al control

Parámetro	T0 vs. inicial	T1 vs. inicial	T2 vs. inicial	T3 vs. inicial	T3 vs. T0 final
DQO	8,0	32,2	33,4	29,6	23,5
DBO ₅	67,3	80,0	83,6	83,6	50,0
Fósforo	63,0	56,1	46,2	60,7	-6,3
Cr(VI)	3,6	35,7	53,6	75,0	74,1
Turbidez	98,9	99,2	97,7	99,2	29,3
Conductividad	-33,3	20,2	27,3	29,5	47,1
Color	44,2	69,8	71,2	70,9	47,8
N total	-30,0	68,3	82,1	71,1	77,8
Amonio	4,0	71,4	66,2	60,3	58,7
ST	4,7	-45,0	-25,6	-20,7	-26,7
SST	66,2	44,5	58,9	60,9	-15,5

Nota. Valores positivos indican disminución; valores negativos indican incremento. La última columna expresa cuánto menor fue T3 que el control final; un valor negativo significa que T3 terminó con una concentración mayor que T0.

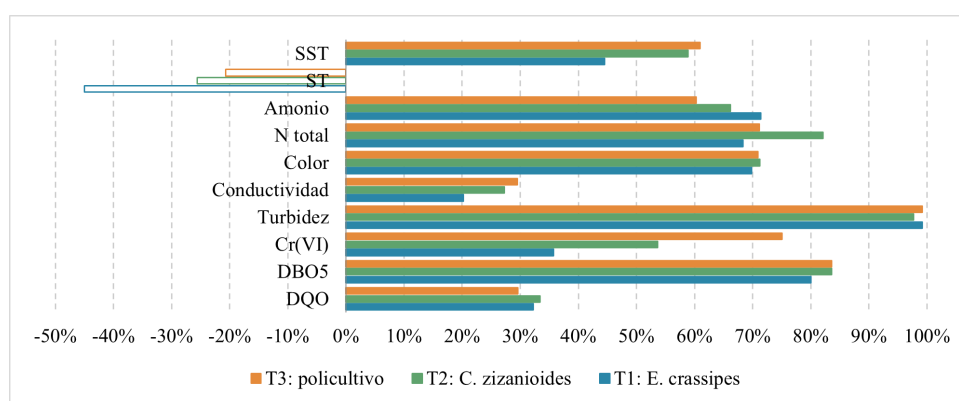


Figura 3: Cambio porcentual al día 45 respecto de la concentración inicial. Los valores negativos representan incrementos

dez, nitrógeno total y SST al día 45. Ningún tratamiento alcanzó los límites establecidos para DQO, conductividad, amonio y sólidos totales.

Por tanto, la fitorremediación mejoró la calidad del efluente, pero requiere una etapa complementaria para lograr el cumplimiento integral.

Mientras que la turbidez disminuyó más de 97 % incluso en el control, lo que demues-

tra una contribución importante de sedimentación u otros procesos no asociados a las plantas. Por esta razón, el 99,2 % de reducción de T3 respecto del inicio no debe interpretarse como efecto vegetal neto; frente al control final, la turbidez de T3 fue solo 29,3 % menor. Un patrón similar ocurrió con SST: el control registró 51,00 mg/L, por debajo de los tratamientos con plantas. La liberación de fragmentos de raíz y biomasa senescente puede explicar este comporta-

Tabla 5: Cumplimiento de los valores de referencia al día 45

Parámetro	Referencia	T0	T1	T2	T3
DQO	500 mg/L	No	No	No	No
DBO ₅	250 mg/L	No	Sí	Sí	Sí
Cr(VI)	0,50 mg/L	Sí	Sí	Sí	Sí
Turbidez	100 NTU	Sí	Sí	Sí	Sí
Conductividad	1000 μ S/cm	No	No	No	No
Nitrógeno total	60 mg/L	No	Sí	Sí	Sí
Amonio	30 mg/L	No	No	No	No
Sólidos totales	1600 mg/L	No	No	No	No
SST	220 mg/L	Sí	Sí	Sí	Sí

miento (Mohd et al., 2020).

En contraste, la conductividad aumentó 33,3 % en el control, mientras disminuyó entre 20,2 y 29,5 % en los tratamientos vegetados. El valor final de T3 fue 47,1 % menor que el control, aunque permaneció muy por encima del valor de referencia. El resultado sugiere inmovilización o incorporación parcial de iones, pero también evidencia que las macrófitas no sustituyen una etapa específica de desalación.

3.3 Efectos de tratamiento, tiempo e interacción

En la **Tabla 6** se observa que el tratamiento tuvo efecto significativo sobre diez de las trece variables resumidas; no fue significativo para fósforo, pH ni SST. El tiempo fue significativo en todas las variables. La interacción tratamiento $\times$ tiempo fue significativa excepto para fósforo y oxígeno disuelto. Estos resultados confirman que las trayectorias dependieron de la combinación tratamiento-tiempo, pero no justifican afirmar que T3 fue universalmente superior. En fósforo, el descenso ocurrió con indepen-

dencia del tratamiento, mientras que para SST el efecto principal del tratamiento no alcanzó significación, a pesar de la interacción temporal.

3.4 Caracterización ampliada final

Entre los parámetros medidos solo al inicio y al final, T3 mostró reducciones descriptivas elevadas de cobre (de 1,63 a 0,12 mg/L), fluoruros (de 41,67 a 4,78 mg/L), zinc (de 365 a 29,11 mg/L) y manganeso (de 6,67 a 3,36 mg/L). También disminuyeron los surfactantes de 2,97 a 1,01 mg/L y las grasas y aceites de 38,03 a 22,80 mg/L. Sin embargo, la ausencia de series temporales completas para estas variables impide atribuir causalidad con el mismo nivel de confianza que en el ANOVA factorial.

Algunas concentraciones aumentaron. En T3, el calcio pasó de 716,67 a 1677,78 mg/L, la dureza de 513,33 a 760,00 mg/L y los sólidos totales de 2190,67 a 2643,67 mg/L, se puede observar el resumen en la Tabla 7.

Se analizan parámetros obligatorios en el Ministerio del Ambiente (2017), en la **Tabla 8**, al día 45, los tratamientos vegetados

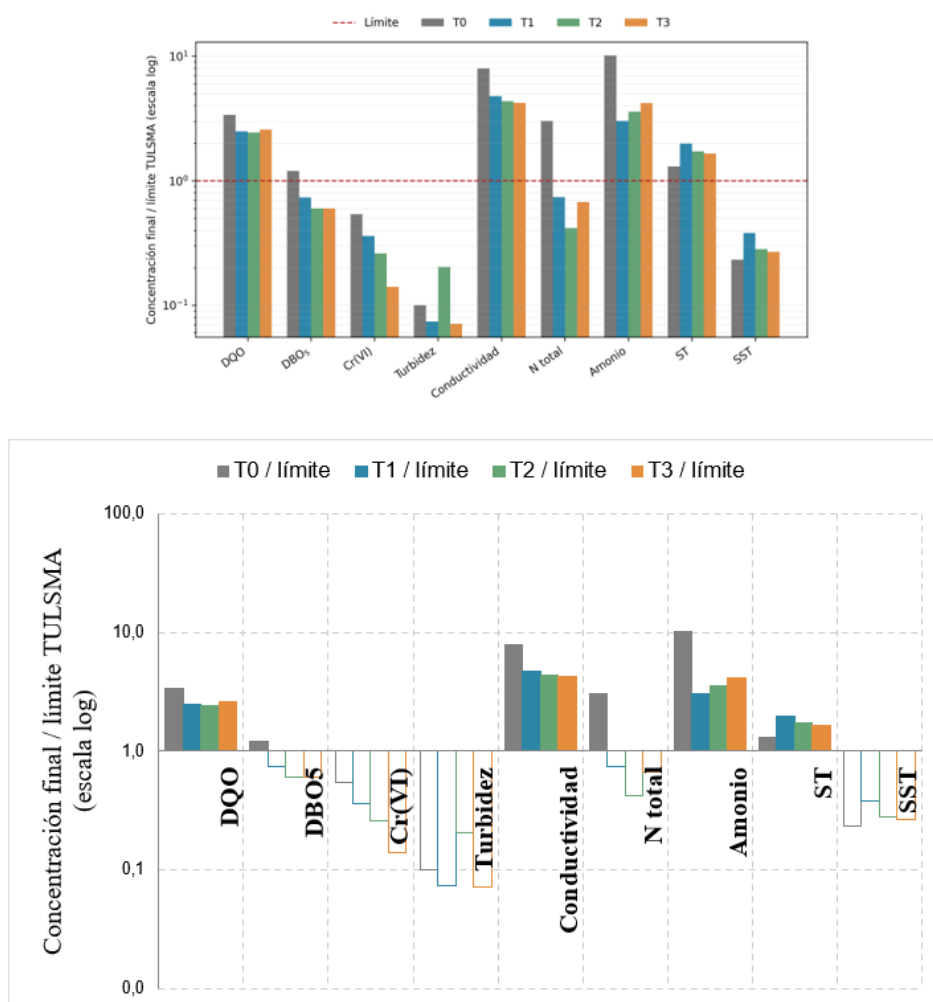


Figura 4: Razón entre la concentración final y el valor de referencia: valores menores o iguales a 1 indican cumplimiento

Nota: la escala logarítmica permite comparar parámetros de magnitudes distintas.

redujeron los surfactantes, fenoles y grasas y aceites, aunque el pH aumentó ligeramente respecto del valor inicial.

T3 presentó las menores concentraciones de surfactantes y grasas y aceites, mientras que T1 fue más eficaz para fenoles; los coliformes fecales aumentaron en T3.

La **Figura 5**, **Figura 6** y **Figura 7** muestran el seguimiento visual de las tres réplicas de

los tratamientos T1 (*Eichhornia crassipes*), T2 (*Chrysopogon zizanioides*) y T3 (combinación de ambas especies) durante los días 0, 7, 15, 30 y 45. A lo largo del ensayo se observa un deterioro progresivo de la biomasa vegetal, caracterizado por marchitez, amarillamiento, necrosis y pérdida de tejido; este efecto fue más evidente en *E. crassipes*, mientras que el vetiver conservó mejor su estructura radical y foliar. En el tratamiento

Tabla 6: Resultados del ANOVA de dos factores (F; p)

Variable	Tratamiento	Tiempo	Tratamiento × tiempo
DQO	35,241; <0,001	89,337; <0,001	7,694; <0,001
DBO ₅	131,039; <0,001	1296,216; <0,001	22,804; <0,001
Fósforo	0,490; 0,692	50,016; <0,001	0,381; 0,936
Cr(VI)	15,851; <0,001	125,741; <0,001	3,976; 0,002
Oxígeno disuelto	4,023; 0,015	6,839; 0,001	1,987; 0,074

Tabla 7: Caracterización ampliada de componentes inorgánicos al inicio y al día 45

Parámetro	Unidad	Inicial	T0	T1	T2	T3
Aluminio	mg/L	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcio	mg/L	716,67	1000,00	1698,89	1446,67	1677,78
Cloruros	mg/L	800,00	960,00	877,78	926,67	581,11
Cobre	mg/L	1,63	0,97	0,24	0,33	0,12
Dureza	mg/L CaCO ₃	513,33	510,00	688,89	817,78	760,00
Fluoruros	mg/L	41,67	30,00	25,78	16,33	4,78
Fosfatos	mg/L	9,33	5,57	5,88	7,27	5,86
Magnesio	mg/L	43,33	40,00	24,44	22,22	27,78
Molibdeno	mg/L	7,23	0,00	1,11	2,00	6,00
Potasio	mg/L	109,00	196,67	110,33	68,56	69,22
Sulfatos	mg/L	266,67	460,00	471,11	397,78	415,56
Zinc	mg/L	365,00	37,67	31,44	37,56	29,11
Manganeso	mg/L	6,67	9,00	3,11	4,67	3,36

combinado también se evidenciaron signos de estrés en ambas especies, por lo que el desprendimiento y la descomposición de la biomasa pudieron contribuir al incremento de sólidos registrado en el efluente.

4. Discusión

Los resultados mostraron una respuesta diferenciada de la materia orgánica frente a los tratamientos de fitorremediación. Aunque la DBO_5 disminuyó entre 80,0 y 83,6 % en las unidades vegetadas, la reducción de DQO fue más limitada, con valores entre 29,6 y 33,4 % (Tabla 4 y Figura 3). Consecuentemente, la DBO_5 alcanzó el valor de referencia en T1, T2 y T3, mientras que ningún tra-

tamiento cumplió el límite establecido para DQO (Tabla 5 y Figura 4). Esta diferencia indica que los sistemas vegetados favorecieron principalmente la eliminación de la fracción orgánica biodegradable, mientras que una proporción importante de compuestos refractarios permaneció en el efluente. Los residuos de curtiembre contienen taninos, colorantes, tensoactivos y productos de acabado resistentes a la degradación biológica; por ello, los humedales y sistemas de fitorremediación suelen presentar mejores resultados como etapas de pulimiento posteriores a procesos de coagulación, oxidación o precipitación. T2 presentó la menor DQO final, mientras que T2 y T3 alcanzaron la mayor reducción de DBO_5 (Tabla 3), lo que de-

Tabla 8: Parámetros obligatorios adicionales al inicio y al día 45

Parámetro	Unidad	Inicial	T0	T1	T2	T3
pH	—	7,61	8,58	8,54	8,42	8,49
Surfactantes	mg/L	2,97	2,07	2,36	1,50	1,01
Fenoles	mg/L	0,41	0,38	0,13	0,21	0,33
Coliformes fecales	NMP/100 mL	9	88	8	8	12
Grasas y aceites	mg/L	38,03	28,20	23,52	26,01	22,80

Nota: la Tabla 7 y Tabla 8 son descriptivas porque estas variables no contaron con series temporales completas.

muestra que el tratamiento más adecuado depende de la fracción orgánica que se pretende remover.

La reducción de Cr(VI) fue máxima en el policultivo T3, con una disminución de 75,0 % respecto del valor inicial y una concentración final 74,1 % menor que la registrada en el control (**Tabla 4** y **Figura 3**). Este comportamiento puede relacionarse con la combinación de superficies radicales y mecanismos de retención aportados por ambas especies. En la rizosfera, el cromo puede ser removido mediante adsorción en las raíces, complejación, precipitación y transformaciones mediadas por microorganismos, mientras que las plantas pueden inmovilizarlo o secuestrarlo como parte de sus mecanismos de tolerancia (Srivastava et al., 2021). No obstante, la concentración inicial de Cr(VI) ya se encontraba por debajo del límite de referencia (**Tabla 2**) y su desviación estándar fue del mismo orden que la media, por lo que la magnitud de la reducción debe interpretarse con cautela. La confirmación del mecanismo requeriría cuantificar el cromo en raíces y tejidos aéreos, diferenciar Cr(III) y Cr(VI) y establecer un balance de masa que permita distinguir entre

acumulación vegetal, precipitación y transformación química.

La turbidez disminuyó entre 97,7 y 99,2 % en las unidades vegetadas, pero también se redujo 98,9 % en el control (Tabla 4 y Figura 3), lo que demuestra que la sedimentación y otros procesos físicos tuvieron una participación determinante. En consecuencia, atribuir toda la reducción observada a *E. crassipes* o *C. zizanioides* sobreestimaría el efecto real de la fitorremediación. No obstante, T1 y T3 finalizaron con valores de turbidez inferiores al control (Tabla 3), lo que sugiere una contribución adicional de la filtración radicular y la retención de partículas. El comportamiento de los SST fue diferente: aunque T3 alcanzó una reducción de 60,9 % respecto del inicio, terminó con una concentración 15,5 % superior a la del control (Tabla 4). Esta respuesta coincide con el deterioro visual registrado durante el ensayo, especialmente con la marchitez, necrosis y pérdida de tejido de *E. crassipes* observadas en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7. El desprendimiento de raíces y hojas senescentes pudo incorporar partículas y materia orgánica al agua, lo que confirma la importancia de cosechar oportunamente la biomasa pa-

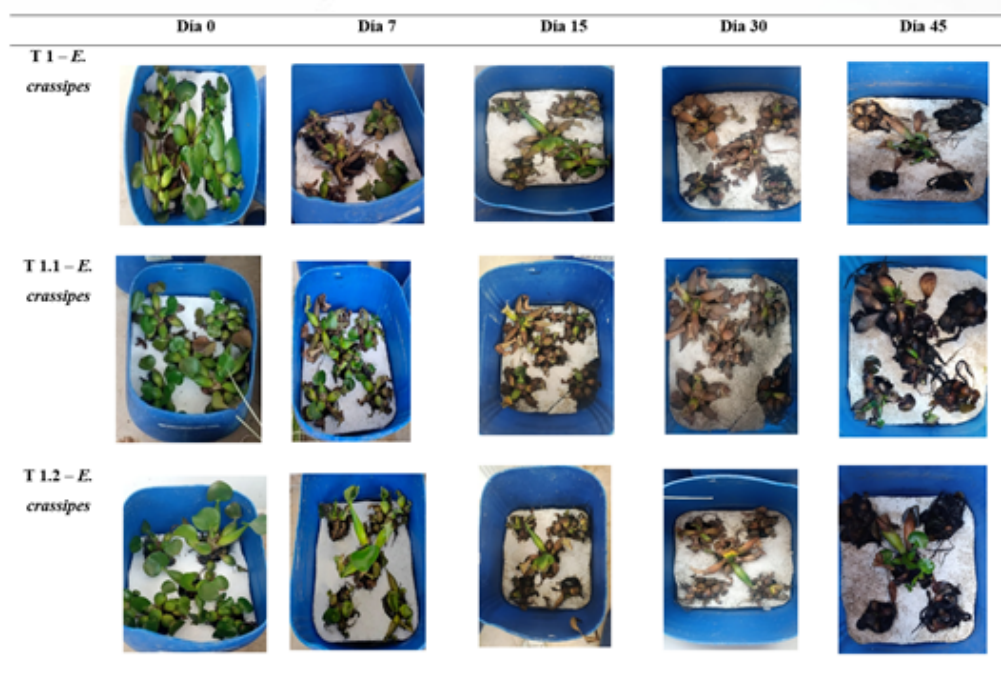


Figura 5: Seguimiento visual de las tres réplicas de T1 (*E. crassipes*) en los días 0, 7, 15, 30 y 45. Se observa pérdida progresiva de tejido vegetal, relevante para interpretar la posible liberación de sólidos

Fuente: fotografías originales del experimento.

ra evitar la devolución de contaminantes al sistema (Mohd et al., 2020).

Los tratamientos también mostraron respuestas diferentes para los compuestos nitrogenados. T2 fue el más eficaz para nitrógeno total, con una reducción de 82,1 %, mientras que T1 presentó la mayor disminución de amonio, correspondiente a 71,4 % (Tabla 4 y Figura 3). Aunque T3 redujo ambos parámetros, el policultivo no superó a los monocultivos, lo que indica que la combinación 1:1 no produjo una sinergia general en la eliminación de nitrógeno. *E. crassipes* puede incorporar nutrientes a su biomasa y proporcionar una superficie favorable para microorganismos nitrificantes y desnitrificantes asociados a la rizosfera (Ren et al., 2020; Ting et al., 2018),

mientras que el sistema radical del vetiver puede favorecer la absorción y retención de nutrientes. Los tratamientos vegetados cumplieron el valor de referencia para nitrógeno total, pero el amonio permaneció por encima del límite en T1, T2 y T3 (Tabla 5 y Figura 4). Futuros estudios deberían evaluar diferentes proporciones de ambas especies y cuantificar nitratos, nitritos, oxígeno disuelto, biomasa inicial y final y actividad microbiana para identificar las rutas predominantes de transformación del nitrógeno (Chiclote et al., 2021).

La conductividad presentó un comportamiento particularmente relevante: aumentó 33,3 % en el control, mientras que disminuyó 20,2, 27,3 y 29,5 % en T1, T2 y T3, respectivamente (Tabla 4 y Figura 3). Además,



Figura 6: Seguimiento visual de las tres réplicas de T2 (*C. zizanioides*) en los días 0, 7, 15, 30 y 45 de izquierda a derecha. Se observa pérdida progresiva de tejido vegetal, relevante para interpretar la posible liberación de sólidos

Fuente: fotografías originales del experimento.

T3 registró una conductividad final 47,1 % menor que la del control, lo que sugiere que los tratamientos vegetados contribuyeron a la retención o incorporación de una fracción de los iones presentes. Pese a ello, todos los valores finales permanecieron por encima de la referencia establecida (Tabla 5 y Figura 4), confirmando que la absorción vegetal no fue suficiente para eliminar las sales conservativas características del procesamiento de pieles (Singh et al., 2023). El incremento de calcio y dureza registrado en algunas unidades (Tabla 7), junto con el aumento de los sólidos totales en los sistemas vegetados (Tabla 3 y Tabla 4), indica que la evaporación, la precipitación química, el balance hídrico y la liberación de componentes vegetales pudieron influir sobre las concentra-

ciones (Abinaya et al., 2018). Asimismo, la aireación intermitente pudo favorecer la oxidación y la actividad microbiana, por lo que su contribución debería diferenciarse mediante controles aireados y no aireados en estudios posteriores.

La caracterización ampliada confirmó que la respuesta dependió tanto del contaminante como de la especie utilizada. T3 presentó ventajas para cobre, fluoruros y surfactantes; T2 fue más eficaz para DQO, color y nitrógeno total; y T1 alcanzó los mejores resultados para amonio y fenoles (Tabla 3, Tabla 7 y Tabla 8). En particular, T3 redujo los surfactantes desde 2,97 hasta 1,01 mg/L y las grasas y aceites desde 38,03 hasta 22,80 mg/L, mientras que T1 alcanzó la menor



Figura 7: Seguimiento visual de las tres réplicas de T3 (combinado ambas plantas) en los días 0, 7, 15, 30 y 45 de izquierda a derecha. Se observa pérdida progresiva de tejido vegetal, relevante para interpretar la posible liberación de sólidos

Fuente: fotografías originales del experimento.

concentración final de fenoles, correspondiente a 0,13 mg/L (Tabla 8). Sin embargo, los coliformes fecales aumentaron en T3 y el pH se incrementó en todos los tratamientos. Por consiguiente, el policultivo mostró beneficios selectivos, pero no una superioridad general sobre los monocultivos. Este comportamiento coincide con estudios que indican que las plantaciones mixtas pueden modificar las funciones radicales y las comunidades microbianas de la rizosfera, sin garantizar una mejora simultánea de todos los parámetros (Zhang et al., 2024).

Los resultados del ANOVA respaldaron la influencia del tratamiento, del tiempo y de su interacción sobre la mayoría de las variables evaluadas (Tabla 6). El efecto del tiempo

fue significativo para todos los parámetros analizados, mientras que la interacción tratamiento $\times$ tiempo resultó significativa para la mayoría de ellos, con excepción del fósforo y el oxígeno disuelto. Esto demuestra que la evolución de las concentraciones no dependió únicamente de la presencia de las especies, sino también de la duración de la exposición y de la respuesta particular de cada tratamiento durante el ensayo. No obstante, la ausencia de un efecto significativo del tratamiento para fósforo, pH y SST limita la atribución de sus cambios a una especie determinada y refuerza la necesidad de interpretar estos parámetros juntamente con el control.

Desde una perspectiva aplicada, la fitorre-

mediación mejoró la calidad del efluente y permitió que los tratamientos vegetados cumplieran los valores de referencia para DBO_5 , Cr(VI), turbidez, nitrógeno total y SST (Tabla 5 y Figura 4). Sin embargo, ninguno logró el cumplimiento simultáneo de DQO, conductividad, amonio y sólidos totales. Por tanto, el sistema evaluado debe considerarse una etapa complementaria de pulimiento y no una alternativa autónoma para el tratamiento integral del efluente de curtiembre. Su implementación a escala industrial requeriría pretratamiento, control del tiempo de retención y del balance hídrico, cosecha periódica de la biomasa, manejo seguro de las plantas contaminadas y validación en sistemas de flujo continuo. Asimismo, la pérdida progresiva de tejido observada durante los 45 días (Figura 5, Figura 6 y Figura 7), sugiere que un tiempo de operación menor o una cosecha anticipada podrían evitar la liberación secundaria de sólidos y mejorar la estabilidad del proceso.

4.1 Limitaciones del estudio

El ensayo utilizó un solo lote de efluente y unidades de laboratorio, por lo que no captura la variación diaria y estacional de una curtiembre. Las plantas fueron sostenidas a un periodo de un mes de aclimatación en el laboratorio luego de ser adquiridas en un vivero de la costa ecuatoriana. La aireación fue intermitente pasando un día, durante dos horas por cada tanque y el balance de evaporación no se documentó durante el experimento pero se mantuvo por debajo del 10 % durante los 45 días de ensayos. No se cuantificaron contaminantes en la biomasa

ni se realizó balance de masa, por lo que los mecanismos de remoción son inferidos. Varios parámetros ampliados se midieron únicamente al inicio y al final.

5. Conclusiones

- Los tres sistemas vegetados mejoraron diversos indicadores del efluente secundario durante 45 días. El policultivo T3 logró reducciones respecto del inicio de 83,6 % en DBO_5 , 75,0 % en Cr(VI), 99,2 % en turbidez, 70,9 % en color, 71,1 % en nitrógeno total, 60,3 % en amonio y 60,9 % en SST.
- La comparación contra el control modificó la interpretación: parte de la reducción de turbidez y SST ocurrió sin plantas. T3 fue claramente mejor que el control para Cr(VI), color, conductividad, nitrógeno y amonio, pero terminó con más sólidos totales y SST.
- No existió un tratamiento universalmente superior. T2 obtuvo las menores concentraciones de DQO, color y nitrógeno total; T1, la menor concentración de amonio; y T3, las menores concentraciones de Cr(VI), turbidez y conductividad.
- El sistema no aseguró cumplimiento integral: DQO, conductividad, amonio y sólidos totales permanecieron fuera de los valores de referencia. La fitorremediación debe integrarse como etapa de pulimiento con pretratamientos y manejo periódico de biomasa.

5.1 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Técnica de Ambato y al personal del Laboratorio de Investigación 1.4 de Análisis Ambiental por las facilidades experimentales. Se agradece a la empresa curtidora participante por autorizar el muestreo bajo reserva de identidad.

6. Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Derechos de autor (copyright)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (copyright). Los datos originales podrán facilitarse previa solicitud razonable a la autora de correspondencia, sujetos a las condiciones institucionales y de confidencialidad de la empresa participante.

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la Taxonomía CRediT para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo. B.M.E.J.: investigación, trabajo experimental, curación inicial de datos y redacción del borrador, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito. N.E.F.T.: conceptualización, metodología, supervisión, vali-

dación, análisis crítico y revisión del manuscrito, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito. R.P.: conceptualización, metodología, supervisión, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito. L.P.: conceptualización, metodología, supervisión, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito. J.D.E.M.: conceptualización, metodología, supervisión, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito.

8.1 Divulgación de la delegación a la IA generativa

Los autores declaran el uso de IA generativa en el proceso de escritura. Según la taxonomía GAIDeT (2025), las siguientes tareas fueron delegadas a las herramientas GAI bajo supervisión humana total: búsqueda y sistematización de la literatura, generación de código, automatización de procesos, validación, limpieza de datos, visualización, corrección y edición, reformato. La herramienta GAI utilizada fue: ChatGPT/Codex (OpenAI, familia GPT-5; consultado del 7 al 8 de agosto de 2026). La responsabilidad del manuscrito final recae íntegramente en los autores. Las herramientas GAI no figuran como autores y no asumen responsabilidad por los resultados finales. Nota adicional: la inteligencia artificial solo se utilizó después que los datos experimentales fueron obtenidos, organizados y analizados como una herramienta de revisión de formato, revisión de cálculos y mejora de imágenes y figuras. Se utilizó ChatGPT (OpenAI) como herra-

mienta de apoyo para reorganizar el contenido, mejorar la claridad lingüística y detectar inconsistencias aritméticas. La herramienta no generó datos experimentales ni sustituyó el análisis científico. Los porcentajes fueron recalculados a partir de las medias reportadas. Los autores verificaron los datos, referencias, interpretación y redacción, aprobaron la versión final y asumen plena responsabilidad por su contenido. Declaración presentada por: Nelly Esther Flores Tapia.

9. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad y desarrollada en el marco del proyecto institucional de la Universidad Técnica de Ambato por parte de la DIDE con el nombre “Descontaminación de aguas residuales industriales en la provincia de Tungurahua con métodos electroquímicos combinados con fitorremediación”, aprobado con Resolución UTA-CONIN-2024-0194-R.

10. References

Abinaya, S., Saraswathi, R., Rajamohan, S., & Mohammed, S. A. (2018). Phyto-remediation of total dissolved solids (TDS) by *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* and *Chrysopogon zizanioides* from second stage RO-brine solution. *Research Journal of Chemistry and Environ-*

ment, 22(5), 36-41. https://www.researchgate.net/publication/324774342_Phyto-remediation_of_total_dissolved_solids_TDS_by_Eichhornia_Crassipes_Pistia_Stratiotes_and_Chrysopogon_Zizanioides_from_second_stage_RO-Brine_solution

Alemu, A., Gabbiye, N., & Lemma, B. (2021). Evaluation of tannery wastewater treatment by integrating vesicular basalt with local plant species in a constructed wetland system. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 721014. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.721014>

Baird, R. B., Eaton, A. D., & Rice, E. W. (Eds.). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association. https://books.google.com.ec/books/about/Standard_Methods_for_the_Examination_of.html?id=V2LhtAEACAAJ&redir_esc=y

Chiclote Rodríguez, L. E., Chiclote Díaz, B., Mariños Legendre, J. C., Diego Pérez, A. S., Huamán Jiménez, A. I., & Pinglo Bazán, M. E. (2021). Biotratamiento para reducción de carga orgánica generada en el agua residual de curtiembres. *Revista de Innovación y Transferencia Productiva*, 1(2), e001. <https://doi.org/10.54353/ritp.v1i2.e001>

Darajeh, N., Idris, A., Truong, P., Abdul Aziz, A., Bakar, R. A., & Che Man, H. (2014). Phytoremediation potential of vetiver system technology for improving the

- quality of palm oil mill effluent. *Advances in Materials Science and Engineering*, 683579, 10. <https://doi.org/10.1155/2014/683579>
- Darajeh, N., Truong, P., Rezania, S., Alizadeh, H., & Leung, D. W. M. (2019). Effectiveness of vetiver grass versus other plants for phytoremediation of contaminated water. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 7(3), 485-500. <https://researcharchive.lincoln.ac.nz/server/api/core/bitstreams/3c28cc6f-7736-49ed-8ebb-a4469d99f480/content>
- Kumar, V., Singh, J., & Kumar, P. (2019). Heavy metal uptake by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) from paper mill effluent: Experimental and prediction modeling studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(14), 14400-14413. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04766-2>
- Ministerio del Ambiente. (2017). Texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente: norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. <https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROUESTA%20ANEXO%201.pdf>
- Mohd Nizam, N. U., Mohd Hanafiah, M., Mohd Noor, I., & Abd Karim, H. I. (2020). Efficiency of five selected aquatic plants in phytoremediation of aquaculture wastewater. *Applied Sciences*, 10(8), 2712. <https://doi.org/10.3390/ap10082712>
- Oruko, R. O., Selvarajan, R., Ogola, H. J. O., Edokpayi, J. N., & Odiyo, J. O. (2020). Contemporary and future direction of chromium tanning and management in sub-Saharan Africa tanneries. *Process Safety and Environmental Protection*, 133, 369-386. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.013>
- Ren, Z., Jia, B., Zhang, G., Fu, X., Wang, Z., Wang, P., & Lv, L. (2020). Study on adsorption of ammonia nitrogen by iron-loaded activated carbon from low temperature wastewater. *Chemosphere*, 262 (127895), 127895. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127895>
- Reyes-Serrano, A., López-Alejo, J. E., Hernández-Cortázar, M. A., & Elizalde, I. (2020). Removing contaminants from tannery wastewater by chemical precipitation using CaO and Ca (OH)₂. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(4), 1107-1111. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.12.023>
- Singh, P. K., Kumar, V., Pratap, S. G., Singh, P. K., Kumar, M., Negi, S., & Raj, A. (2023). Characterization of inorganic and organic pollutant load in tannery wastewater: biochemical and haematological induced changes in Swiss mice. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 12, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100387>
- Srivastava, D., Tiwari, M., Dutta, P., Singh, P., Chawda, K., Kumari, M., & Chakrabarty, D. (2021). Chromium stress in plants: Toxicity, tolerance and phyto-

remediation. *Sustainability*, 13(9), 4629. <https://doi.org/10.3390/su13094629>

Ting, W. H. T., Tan, I. A. W., Salleh, S. F., & Wahab, N. A. (2018). Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.011>

Xin, J., Tang, J., Liu, Y., Zhang, Y., & Tian, R. (2019). Pre-aeration of the rhizosphere offers potential for phytoremediation of heavy metal-contaminated wetlands. *Journal of Hazardous Materials*, 374, 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.010>

Zhang, Y., Han, Y., Xie, E., Wang, X., Yang, Y., & Jia, F. (2024). Phytoremediation performance of mixed planting patterns and the associated rhizosphere microbial community in pilot-scale constructed wetlands. *Chemosphere*, 361 (142482), 142482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142482>

Zhao, C., & Chen, W. (2019). A review for tannery wastewater treatment: Some thoughts under stricter discharge requirements. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 26102-26111. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05699-6>

Zhao, J., Wu, Q., Tang, Y., Zhou, J., & Guo, H. (2022). Tannery wastewater treatment: Conventional and promising processes,

an updated 20-year review. *Journal of Leather Science and Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s42825-022-00082-7>